



TITLE:

Analysis and Control of Multiscale Dynamics
in Regional Electricity and Heat Supply
Systems(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Hoshino, Hikaru

CITATION:

Hoshino, Hikaru. Analysis and Control of Multiscale Dynamics in Regional Electricity and Heat Supply Systems. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20374>

RIGHT:

許諾条件により本文は2018-03-23に公開

(続紙 1)

京都大学	博士（工学）	氏名	星野 光
論文題目	Analysis and Control of Multiscale Dynamics in Regional Electricity and Heat Supply Systems (地域電熱供給システムにおける複合スケールダイナミクスの解析と制御)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、地域電熱供給システムにおける複合スケールダイナミクスの解析と制御を行ったものであり、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景および目的を述べている。本研究の背景には、統合化エネルギーシステム（Energy Systems Integration; ESI）の実現に向けた未解決課題がある。ESIは電気や熱、ガスなど多様な形態のエネルギーを一括して扱うことを指しており、安定的かつ高効率なエネルギー供給の達成を目指すものである。従来、電気を供給する電力システムは、そこで生じる物理現象を時間スケールにより分類することで扱われてきた。すなわち、物理現象のスケール分離が解析や制御の前提とされてきた。一方、ESIにおいては、多様な形態のエネルギーを供給するサブシステム間の相互作用により生じる複合スケール性の扱いが課題となる。本章では、ESIの先行研究および技術的な背景の議論を基に、基礎的なモデルとして2つのコージェネレーションユニット（Combined Heat and Power; CHP）を有する2サイトシステムを導入し、次章以降の解析および制御の準備を行っている。</p> <p>第2章では、従来の電力システムにおける安定性解析手法の有効性と限界を再考している。まず、電気と熱のサブシステムの動特性のスケール分離を仮定し、熱サブシステムの影響をパラメータとして含む解析モデルを導出した。これにより、上記仮定の下で従来の安定性解析手法を用いて、熱サブシステムが電気サブシステムへ与える影響を定量的に評価可能であることを示している。一方、仮定が成立しない場合には、熱サブシステムの運用に伴う過渡的な不安定性が発生することを示し、詳細な解析には熱サブシステムの動特性モデルが必要であることを指摘している。</p> <p>第3章では、電気サブシステムとの相互作用を簡易に記述することを目的として、熱サブシステムの複合スケールダイナミクスを解析している。特に、蒸気供給ネットワークに対して、複数のボイラと蒸気配管における蒸気輸送のダイナミクスを記述する簡易モデルを導出した。低マッハ数における物理的な近似および幾何学的特異摂動論の双方の観点から検討を行い、ボイラ圧力の遅い動特性を表す集中定数モデルと蒸気流速の速い動特性を表す分布定数モデルが組み合わさった従来モデルの複合スケール性を保持した簡易な集中定数モデルが導出可能であることを示している。また、上記解析により、簡易な集中定数モデルの相空間内の法双曲不変多様体（NHIM）が蒸気供給ダイナミクスの複合スケール性を特徴付けており、同不変多様体付近で、電力システムの場合と同様のスケール分離が可能であることを指摘した。</p> <p>第4章では、上述の解析およびモデルに基づき、電気および熱の需給バランスを確保する制御系を設計している。電気供給に関しては、商用電力系統の要求に応じて有効電力を制御すること（アンシラリーサービスの提供）が重要な課題であり、そのためには2サイトシステム内の需給の変動を補償し連系点電力を一定に維持する機能が求められる。熱供給に関しては、ボイラ圧力の変化として現れる需給のアンバランスを補償す</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	星野 光
<p>ることが重要である。本章では、電気および熱サブシステムの両方に影響する CHP への燃料供給量を入力とし、連系点電力およびボイラの平均圧力を出力とすることで、非線形制御における入出力線形化に基づく制御を適用し上記制御目的を達成した。この際、同制御の適用に必要なとなるシステムの最小位相性の条件を導出し、同条件が第 3 章における NHIM の解析に基づき簡略化可能であることを示している。</p> <p>第 5 章では、エネルギーフローの目標値追従を達成する制御系を設計している。第 4 章で達成した安定化制御は需給バランスの確保に重要である一方で、負荷および再生可能エネルギー源の出力の変動の下ではエネルギーフローの計画値からのずれをもたらす。この意味で本章における検討は、エネルギーシステムの階層的な需給制御の設計の課題に関連している。従来はエネルギーフローの計画と需給バランスを確保する制御との間でスケール分離が成立していたのに対し、再生可能エネルギーの導入に伴う不確実性の下では、エネルギー供給の計画と実際の物理的なフローの整合性を確保することが重要となる。本章では、上記背景から、2 サイトシステムにおける電気および熱のフローを制御量（出力）とする制御系を設計し、目標値追従を達成した。ここで、第 4 章における制御系と共通の制御手法を用いることにより、需給バランス確保と目標値追従の 2 つの制御目的を選択可能な制御系設計を達成した。</p> <p>第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果についてまとめると共に、今後の研究の展開について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、エネルギーシステムの統合化の基礎的なモデルである地域電熱供給システムの解析と制御を行ったものであり、(1)電気サブシステムの安定性解析、(2)熱サブシステムの複合スケール性の解析、(3)需給バランス確保のための安定化制御、(4)エネルギーフローの追従制御の4点に関する理論的、数値的検討の一連の成果をまとめたものである。本論文により得られた主要な結果は以下の通りである。

(1) 電気と熱のサブシステムの動特性のスケール分離を仮定し、熱サブシステムの影響をパラメータとして含む解析モデルを導出した。上記仮定の下で従来の電力システムの安定性解析手法が適用可能であることを示した。一方、仮定が成立しない場合には過渡的な不安定性が発生することを示し、詳細な解析には熱サブシステムの動特性モデルが必要であることを指摘した。

(2) 電気サブシステムとの相互作用を簡易に記述することを目的として、複数のボイラと蒸気配管を含む熱供給ネットワークの動特性を解析した。結果として、ボイラ圧力の遅い動特性を表す集中定数モデルと蒸気流速の速い動特性を表す分布定数モデルが組み合わさった従来モデルの複合スケール性を保持した上で、簡易な集中定数モデルの導出に成功した。

(3) 上述の解析およびモデルに基づき、電気および熱の需給バランスを確保する制御系を設計した。電気および熱サブシステムの両方に影響するコージェネレーションシステムへの燃料供給量を操作量とし、電気に関しては連系点電力、熱に関してはボイラの平均圧力を制御量とすることで、システムの入出力関係に基づく制御手法を適用し、安定化制御を達成した。

(4) 達成した安定化制御は需給バランスの確保に重要である一方で、負荷および再生可能エネルギー源の出力の変動の下ではエネルギーフローの計画値からのずれをもたらす。そこで、電気および熱のフローを制御量（出力）とする制御系を設計した。(3)の安定化制御と共通の制御手法を用いることにより、安定化と出力追従を選択可能な制御系設計を達成した。

上記のように、本論文では、電気と熱の供給が結合し複数のスケールが共存する統合化エネルギーシステムの解析と制御に関して、基礎的な課題設定およびその解析は極めて独創的であって、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 1 月 30 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。